

ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA COMPACTAÇÃO NA RESISTÊNCIA DO BETÃO À CARBONATAÇÃO

Rui D. Neves^{*1}, João Vinagre Santos¹ e André V. Monteiro²

¹Instituto Politécnico de Setúbal (ESTBarreiro/IPS), Secção de Estruturas e Geotecnia - Barreiro, Portugal

²Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Depart. Materiais, Núcleo de Betões - Lisboa, Portugal

**Email: rui.neves@estbarreiro.ips.pt*

RESUMO: *No presente trabalho estudou-se a influência de 3 condições de compactação na resistência à acção do dióxido de carbono, avaliada em ensaios de exposição natural. Utilizaram-se quatro composições de betão e dois tipos de cimento. O trabalho desenvolvido permitiu concluir que os betões com cimento CEM IV/B são sensíveis às condições de compactação, sendo que a aplicação de uma compactação inadequada pode originar reduções importantes do tempo de vida útil.*

1. INTRODUÇÃO

A corrosão do aço no betão é a causa mais frequente de deterioração das estruturas de betão armado. Para prevenir que este tipo de deterioração ocorra de forma prematura, é importante assegurar a protecção do aço no interior do betão. A forma mais económica será garantir uma barreira de betão, designada por recobrimento, com qualidade e espessura adequadas.

As especificações para garantir a qualidade do betão de recobrimento têm sido efectuadas de uma forma prescritiva, isto é, aplicando limites às dosagens dos constituintes juntamente com regras de boa prática.

Todavia, no sentido de uma utilização mais racional dos recursos disponíveis, a via mais adequada para assegurar a qualidade do betão de recobrimento será a especificação de exigências de desempenho, abordagem já considerada na NP EN 206-1 [IPQ, 2005].

Nas situações em que são especificadas exigências de desempenho, a sua verificação tem sido efectuada em provetes de controlo, produzidos e curados em laboratório [Ferreira *et al.*, 1996] [Guerinet, 2005] [Salta *et al.*, 1996]. Porém, para garantir a durabilidade do betão nas estruturas, não basta a obtenção, em laboratório, de valores satisfatórios nas propriedades relacionadas com a durabilidade. É também necessário garantir, em obra, a execução de práticas adequadas no que diz respeito à amassadura, transporte, colocação, compactação e cura, de entre as quais, do ponto de vista da durabilidade, a compactação e a cura são as mais importantes [Branco & Brito, 2004], uma vez que são elas que vão promover a saída do ar aprisionado durante as operações anteriores e o seccionamento da rede de poros capilares no betão, respectivamente.

A eficiência da compactação depende, fundamentalmente, dos meios utilizados para a sua realização, das dimensões dos elementos de betão a compactar, do tempo dispendido e do material utilizado na cofragem. Este último factor está relacionado com a capacidade de reflexão das ondas vibratórias pelas superfícies de cofragem. Se as ondas, ao invés de serem reflectidas, forem absorvidas pelo material de cofragem, perde-se eficiência na compactação.

A avaliação da eficiência de um determinado procedimento de compactação, não é fácil. Na BS 1881 [BSI, 1983] essa avaliação é efectuada através da observação de vazios,

comparando-se o aspecto do betão, que se pretende avaliar, em carotes, com fotografias padrão. Esta análise implica, logo à partida, a extracção de provetes das estruturas. Em alguns casos, o excesso de vazios pode ser directamente observado na superfície dos elementos estruturais (Figura 1).



Figura 1. Excesso de vazios visíveis na superfície de um pilar.

Ao contrário do que sucede com a influência das condições de cura na durabilidade dos betões, existem poucos estudos experimentais acerca da influência da compactação. Um documento de referência, no que diz respeito à durabilidade do betão, o boletim do CEB [1989], apenas classifica a compactação de forma qualitativa. O mesmo documento aponta para uma variação da permeabilidade em mais de uma ordem de grandeza, entre situações de compactação adequada e inadequada (Figura 2).

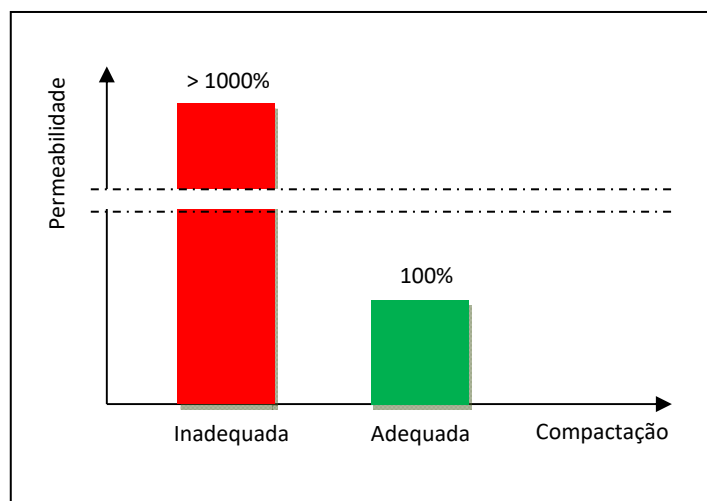


Figura 2. Influência da qualidade da compactação na permeabilidade do betão, adaptado de [CEB, 1989].

Assim, o presente trabalho surge com o intuito de contribuir para o conhecimento da influência da compactação na durabilidade das estruturas de betão armado. Mais em detalhe, procura-se avaliar a influência de diferentes procedimentos de compactação na resistência do betão à carbonatação.

2. MATERIAIS

No estudo foram utilizadas quatro composições de betão e dois tipos de cimento: CEM I 32.5 R e CEM IV/B 32.5 N, de acordo com a norma NP EN 197-1 [IPQ, 2001]. O agregado grosso é calcário britado e o agregado fino é natural de origem siliciosa. Foram ainda utilizados dois tipos de adjuvante: um plastificante, baseado em lignosulfonatos modificados, e um superplastificante, baseado num condensado de polinaftaleno sulfonatado. Nas tabelas 1, 2 e 3 apresentam-se as propriedades dos materiais utilizados.

Tabela 1. Análise química dos cimentos CEM I 32.5 R e CEM IV/B 32.5 N.

Componente	CEM I 32.5 R (%)	CEM IV/B 32.5 (%)
SiO ₂	20.0	32.0
Al ₂ O ₃	5.7	13.8
Fe ₂ O ₃	3.0	5.4
CaO	60.8	36.7
MgO	1.6	1.9
K ₂ O	0.3	1.1
Na ₂ O	0.2	0.1
C ₃ S*	45.8	-
C ₂ S*	22.7	-
C ₃ A*	10.1	-
C ₄ AF*	9.2	-
Perda ao fogo	3.6	3.2
Resíduo insolúvel	2.2	33.0
Sulfatos	2.4	2.0
Cloretos	0.02	0.02

* Segundo as fórmulas de Bogue

Tabela 2. Composição dos cimentos CEM I 32.5 R e CEM IV/B 32.5 N.

Cimento	Clínquer	Filer	Cinzas volantes	Sulfato de cálcio
CEM I 32.5 R	90.9 %	5 %	-	4.1 %
CEM IV/B 32.5	54.3 %	3 %	39.3 %	3.4 %

Tabela 3. Propriedades dos agregados.

Cimento	Massa volúmica (kg.m ⁻³)	Módulo de finura	Dimensão máxima (mm)	Absorção (%)
Agregado grosso 2	2690	7.23	25.0	0.57
Agregado grosso 1	2670	6.22	12.5	0.88
Agregado fino	2600	2.63	2.36	-

Na Tabela 4 encontram-se as dosagens dos constituintes e as razões água-cimento, referentes às várias composições utilizadas.

Tabela 4. Composições de betão.

Constituinte	A1	C1	A2	C2
Agregado grosso 2 (kg.m ⁻³)	316	345	336	368
Agregado grosso 1 (kg.m ⁻³)	796	867	799	875
Agregado fino (kg.m ⁻³)	788	657	732	587
CEM I 32.5 R (kg.m ⁻³)	260	340	-	-
CEM IV/B 32.5 (kg.m ⁻³)	-	-	260	340
Água (l.m ⁻³)	169.3	153.3	169.3	153.3
Plastificante (l.m ⁻³)	2.51	-	2.51	-
Superplastificante (l.m ⁻³)	-	4.11	-	4.11
Razão água-cimento	0.65	0.45	0.65	0.45

3. MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Para cada composição utilizada moldaram-se 3 placas de 300×300×150 mm³ e 6 cubos com 150 mm de aresta.

A primeira placa e os dois primeiros cubos foram compactados com vibrador de agulha até ao aparecimento de uma leitada à superfície e até à clara diminuição da saída de bolhas de ar do betão [IPQ, 2003]. Procurou-se, para estes provetes, obter a compactação mais eficiente.

A segunda placa, bem como o terceiro e o quarto cubo, foram compactados também com vibrador de agulha, mas durante metade do tempo aplicado nos seus pares anteriores.

Finalmente, a terceira placa e os últimos dois cubos, foram compactados simplesmente por apiloamento. Este procedimento corresponde, no presente trabalho, às condições de compactação menos eficientes.

As placas foram curadas durante 7 dias em câmara saturada, após o que foram colocadas em sala condicionada a 20° C e 65% HR até aos 28 dias de idade.

Os cubos foram curados em câmara saturada durante 28 dias.

Aos 28 dias as placas foram fracturadas, obtendo-se duas partes aproximadamente iguais. A face recém-fracturada, bem como a face que lhe é oposta e os topos (Figura 3), foram pintadas com uma tinta epóxida, de modo a garantir a sua impermeabilização. Assim, somente duas faces, uma moldada e outra de enchimento, se encontraram sujeitas à acção do dióxido de carbono.

Uma vez concluído o processo de isolamento das faces laterais, as placas foram colocadas no terraço do edifício principal do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Figura 3). Em termos de classificação da agressividade das condições ambientais, as condições de exposição correspondem a uma situação de ambiente urbano, não protegido da acção da chuva. De acordo com a NP EN 206-1 [IPQ, 2005], estas condições enquadram-se numa classe de exposição ambiental XC4. A colocação dos provetes foi efectuada de forma a que as faces não isoladas ficassem expostas aproximadamente nas mesmas condições. As referidas faces constituíram as superfícies verticais dos provetes expostos.



Figura 3. Provetes em exposição no terraço do LNEC.

Os provetes foram mantidos nas referidas condições durante seis anos e meio.

Após terem sido retirados do terraço, os provetes foram fracturados perpendicularmente às superfícies não isoladas. As superfícies recém-fracturadas foram limpas e aspergidas com solução alcoólica de fenolftaleína, tendo-se medido a profundidade de carbonatação por observação da reacção corada (Figura 4).



Figura 4. Medição da profundidade de carbonatação.

Como se pode observar na Figura 4, também se verificou carbonatação através das faces isoladas. Este facto deve-se à degradação da tinta (Figura 5) e, consequentemente, das suas propriedades isolantes. A face fracturada foi a que ficou virada para o sol, o que promoveu uma degradação mais rápida de tinta. É evidente um maior avanço da carbonatação nesta face, do que naquela que ficou protegida dos raios solares.



Figura 5. Pormenor da degradação da tinta.

Os cubos com 150 mm de aresta foram ensaiados à compressão aos 28 dias de idade, sendo que as respectivas faces de ensaio foram rectificadas.

4. RESULTADOS E ANÁLISE

Uma vez que a influência da compactação na qualidade final do betão é afectada pela trabalhabilidade, indicam-se em primeiro lugar os abaixamentos medidos nas amassaduras das várias composições utilizadas.

Os abaixamentos medidos nas amassaduras dos betões A1, C1, A2 e C2, foram 100, 182, 200 e 190 mm, respectivamente.

A profundidade de carbonatação num elemento de betão é uma variável aleatória que pode ser convenientemente caracterizada através de uma distribuição Normal [Neves, XXXX]. Assim, os resultados das medições efectuadas, são representados pela média e desvio padrão de cada amostra (Tabela 5), indicando-se também o número de elementos (leituras) de cada amostra.

Tabela 5. Profundidades de carbonatação.

Amostra	Número de leituras	Média (mm)	Desvio padrão (mm)
A1 – Compactação óptima	45	8.0	3.0
A1 – Compactação intermédia	40	7.6	1.7
A1 – Apiloamento	40	8.2	1.8
C1 – Compactação óptima	36	3.4	2.2
C1 – Compactação intermédia	35	2.8	1.2
C1 – Apiloamento	29	2.4	0.9
A2 – Compactação óptima	28	19.6	2.1
A2 – Compactação intermédia	23	21.0	1.5
A2 – Apiloamento	29	22.6	2.5
C2 – Compactação óptima	34	7.3	2.2
C2 – Compactação intermédia	39	9.3	1.7
C2 – Apiloamento	43	10.7	2.4

Na Figura 6 representam-se graficamente as profundidades de carbonatação médias das diferentes amostras.



Figura 6. Profundidades de carbonatação médias.

Verifica-se que, nos betões com cimento CEM I 32.5 R, a variação da resistência à carbonatação não é consistente com a compactação (A1), ou até contrária ao que seria expectável (C1).

Todavia, noutro estudo experimental [Gonen e Yazicioglu, 2007], a resistência à carbonatação de um betão com cimento Portland, com uma razão água-cimento de 0.53, intermédia em relação às utilizadas no presente estudo, demonstrou ser fortemente influenciada pelas condições de compactação.

Tendo em conta essa constatação e face dos resultados obtidos, presume-se que, nas condições do presente estudo, a compactação por apiloamento terá sido suficiente para evitar a perda de desempenho dos betões A1 e C1.

Nos betões com cimento CEM IV/B 32.5 N observa-se uma crescente resistência à carbonatação à medida que as condições de compactação se aproximam das ideais. Assim, procede-se a avaliação estatística da significância desse facto.

Não se tendo observado uma variação consistente do desvio padrão com a média das profundidades de carbonatação e dado que a profundidade de carbonatação se ajusta satisfatoriamente a uma distribuição Normal, utiliza-se o teste de Student para populações com variâncias iguais.

O teste de Student, ou teste t, para populações com variâncias iguais, é um teste de hipóteses paramétrico, que utiliza a média e o desvio padrão das amostras em estudo, em que a estatística do teste à diferença das médias é dada por:

$$T = \frac{(\mu_A - \mu_B) - \delta}{\sqrt{\frac{(n_A - 1) \times \sigma_A^2 + (n_B - 1) \times \sigma_B^2}{n_A + n_B - 2} \times \left(\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_B} \right)}} \quad (1)$$

em que:

T é a estatística do teste de Student;

μ_A é a profundidade de carbonatação média do conjunto A;

μ_B é a profundidade de carbonatação média do conjunto B;

δ é a diferença entre as médias que se pretende testar;

n_A é o número de resultados do conjunto A;

σ_A é o desvio padrão da profundidade de carbonatação do conjunto A;

n_B é o número de resultados do conjunto B;

σ_B é o desvio padrão da profundidade de carbonatação do conjunto B.

O valor crítico, t_{crit} , a comparar com a estatística do teste, será

$$t_{crit} = t_{(n_A+n_B-2)}^{-1}(\alpha) \quad (2)$$

em que:

$t_{(n_A+n_B-2)}^{-1}(\cdot)$ é a inversa da função distribuição de Student para $n_A + n_B - 2$ graus de liberdade;
 α é o nível de significância definido.

Pode também calcular-se o valor de prova, p , para o teste de Student, através de

$$p = t_{(n_A+n_B-2)}(T) \quad (3)$$

Para hipótese nula considera-se “as profundidades de carbonatação médias das populações representadas pelos dois conjuntos têm uma diferença δ ”. Para hipótese alternativa considera-se “as profundidades de carbonatação médias das populações representadas pelos dois conjuntos têm uma diferença superior a δ ”.

Numa primeira análise, estuda-se a viabilidade da hipótese nula para $\delta = 0$, adoptando um nível de significância $\alpha = 5\%$. Na Tabela 6 apresentam-se os respectivos resultados.

Tabela 6. Resultados do teste de Student.

Conjunto A	Conjunto B	T	t_{crit}	p
A2 – Apiloamento	A2 – Vibr. 50%	2.70	2.01	0.5%
A2 – Apiloamento	A2 – Vibr. 100%	4.88	2.00	$\approx 0\%$
A2 – Vibr. 50%	A2 – Vibr. 100%	2.73	2.01	0.4%
C2 – Apiloamento	C2 – Vibr. 50%	2.11	1.99	1.9%
C2 – Apiloamento	C2 – Vibr. 100%	5.49	1.99	$\approx 0\%$
C2 – Vibr. 50%	C2 – Vibr. 100%	4.54	1.99	$\approx 0\%$

A hipótese nula foi rejeitada em todas as situações testadas, com valores de prova baixos, o que reforça a viabilidade da hipótese alternativa. Nessa medida, considera-se, para estes casos, que a compactação influencia a resistência à carbonatação.

Com o intuito de averiguar as implicações que uma compactação insuficiente pode ter na vida útil de uma estrutura de betão armado, determinam-se os intervalos de confiança de δ .

Considerando que a variável aleatória que representa a diferença entre as profundidades de carbonatação médias, δ , tem uma distribuição Normal, os limites de cada intervalo de confiança vão estar afastados $\Delta\delta$, de δ . O cálculo do afastamento, para um nível de confiança de $(1-\alpha) \times 100\%$, é efectuado de acordo com

$$\Delta\delta = t_{(n_A+n_B-2)}^{-1}(\alpha/2) \times \sqrt{\frac{\sigma_A^2}{n_A} + \frac{\sigma_B^2}{n_B}} \quad (4)$$

em que:

$t_{(n_A+n_B-2)}^{-1}(\cdot)$ é a inversa da função distribuição de Student para $n_A + n_B - 2$ graus de liberdade;

n_A é o número de resultados do conjunto A;

σ_A é o desvio padrão da profundidade de carbonatação do conjunto A;

n_B é o número de resultados do conjunto B;

σ_B é o desvio padrão da profundidade de carbonatação do conjunto B.

Os resultados deste procedimento, para um nível de confiança de 95% ($\alpha = 5\%$), são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Intervalos de confiança para as diferenças entre as profundidades de carbonatação médias.

Conjunto A	Conjunto B	$\delta - \Delta\delta$ (mm)	δ (mm)	$\delta + \Delta\delta$ (mm)
A2 – Apiloamento	A2 – Vibr. 50%	0.4	1.6	2.8
A2 – Apiloamento	A2 – Vibr. 100%	1.8	3.0	4.3
A2 – Vibr. 50%	A2 – Vibr. 100%	0.4	1.4	2.5
C2 – Apiloamento	C2 – Vibr. 50%	0.1	1.1	2.1
C2 – Apiloamento	C2 – Vibr. 100%	2.0	3.1	4.3
C2 – Vibr. 50%	C2 – Vibr. 100%	1.2	2.1	2.9

Considere-se agora o Estado Limite de Despassivação, isto é, que a vida útil da estrutura termina quando a frente de carbonatação atinge a profundidade a que se encontram as armaduras. Adoptando um tempo de vida útil de 50 anos e admitindo que a profundidade de carbonatação evolui proporcionalmente à raiz quadrada do tempo, é possível calcular a espessura de recobrimento necessária.

Tomam-se como referência as profundidades de carbonatação médias, medidas nos provetes com compactação óptima. Para as restantes situações acrescem em relação aos valores de referência as respectivas diferenças, que se encontram na Tabela 7.

Assim, para as situações de referência, o recobrimento será obtido através de

$$c = x_{ref} \times \sqrt{\frac{50}{6.5}} \quad (5)$$

em que:

c é o recobrimento, em mm;

x_{ref} é a profundidade de carbonatação média da situação de referência, em mm.

Para as restantes situações, o tempo de vida útil será obtido através de

$$t_{vu} = 6.5 \times \left(\frac{c}{x_{ref} + \Delta} \right)^2 \quad (6)$$

em que Δ é o acréscimo, obtido da Tabela 7, para cada situação em estudo, em mm.

Utilizando as expressões anteriores obtêm-se recobrimentos de 54 e 20 mm, para os betões A2 e C2, respectivamente. Os tempos de vida útil são apresentados na Tabela 8.

Nas figuras 7 e 8 representam-se graficamente os tempos de vida útil médios e as respectivas margens de erro, para as situações estudadas, em percentagem do tempo de vida útil associado à compactação óptima de cada betão.

Tabela 8. Tempos de vida útil (anos) estimados.

Situação	Mínimo	Médio	Máximo
A2 – Vibr. 100%	-	50	-
A2 – Vibr. 50%	39	43	48
A2 – Apiloamento	33	37	41
C2 – Vibr. 100%	-	50	-
C2 – Vibr. 50%	25	30	36
C2 – Apiloamento	19	24	31

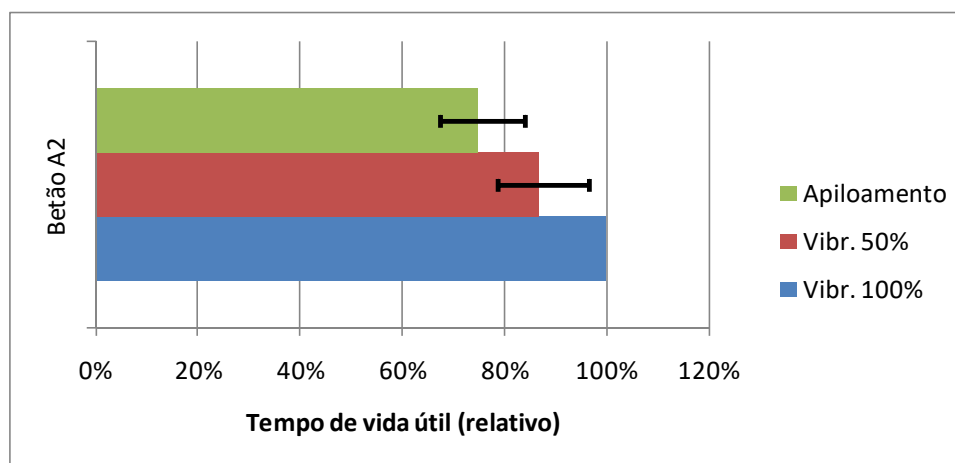


Figura 7. Tempos de vida útil relativos para o betão A2.

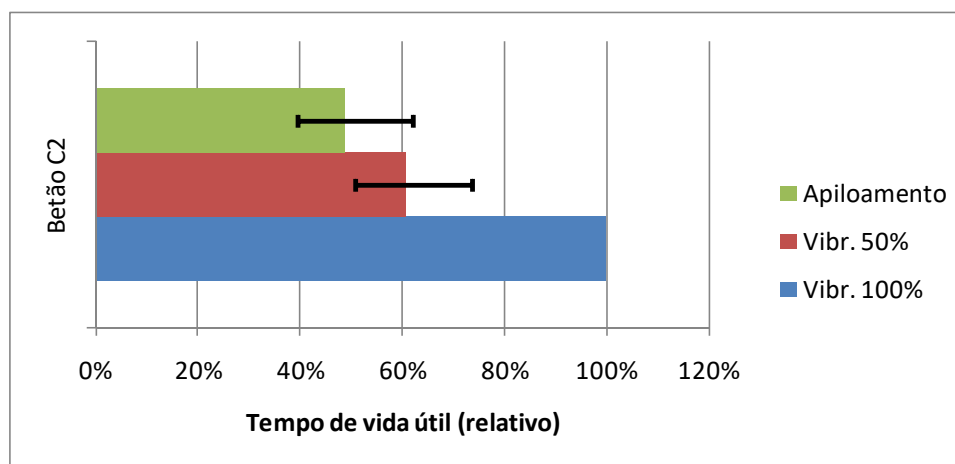


Figura 8. Tempos de vida útil relativos para o betão C2.

Verifica-se que à medida que as condições de compactação se afastam das ideais, os tempos de vida útil estimados diminuem. As reduções do tempo de vida útil calculadas oscilam entre 4 e 60%, para um tempo de vida útil previsto de 50 anos e classe de exposição ambiental XC4. Os efeitos de uma compactação inadequada são mais marcados no betão C2.

Embora o objectivo do estudo seja avaliar a influência da compactação na resistência à carbonatação, determinou-se também a resistência à compressão utilizando provetes com diferentes compactações. Os resultados são apresentados na Figura 9. Não se efectua a análise estatística dos mesmos, devido ao reduzido número de resultados (dois) para cada situação.

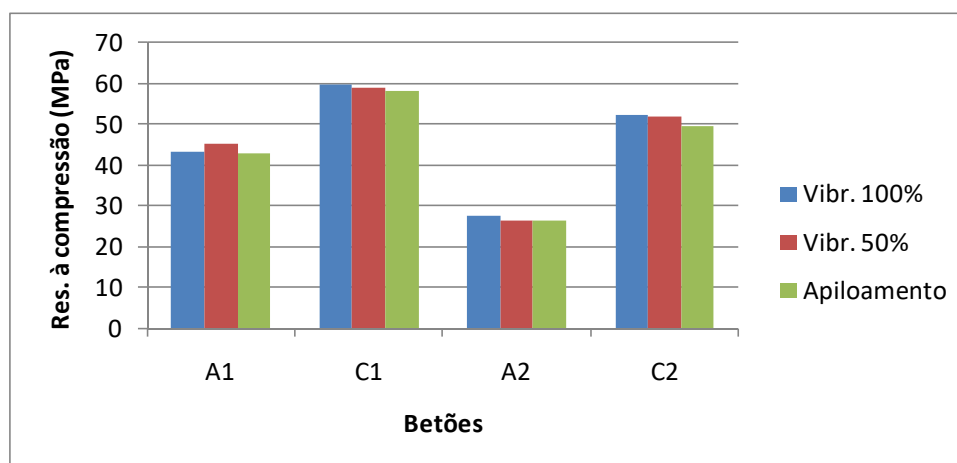


Figura 9. Resistências à compressão.

Em geral, as maiores resistências à compressão correspondem às condições de vibração óptima. Todavia as diferenças observadas são pequenas. A maior diferença entre resistências do mesmo betão foi de 2.7 MPa. Num estudo efectuado por Gonçalves [1987] em provetes cuja compactação foi efectuada de três formas diferentes, não foi detectada uma influência clara da compactação na resistência à compressão.

Gonen e Yazicioglu [2007] só verificaram diferenças significativas na resistência à compressão entre provetes compactados e não compactados. Entre diferentes níveis de compactação, a resistência à compressão exibiu valores similares.

A falta de associação, observada nos betões com cimento CEM I 32.5 R, entre a compactação e a resistência à carbonatação, poderia ser justificada pelo facto de os poros devidos ao ar aprisionado no interior do betão não comunicarem com o exterior. Todavia, se esses poros existissem, teriam afectado a resistência à compressão.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho desenvolvido permitiu verificar que os betões com cimento CEM IV/B 32.5 N são particularmente sensíveis às condições de compactação. De facto, nestes betões, a resistência à carbonatação foi classificada como estatisticamente diferente entre as diversas condições de compactação utilizadas. Essa diferença pode conduzir a reduções do tempo de vida útil entre 4 e 60% para um tempo de vida útil de 50 anos e uma classe de exposição ambiental XC4, existindo indicações, que deverão ser objecto de futuros estudos, de que quanto maior for o potencial de desempenho do betão, mais vincada será a influência da compactação.

Quanto aos betões com cimento CEM I 32.5 R, o estudo não foi conclusivo, ao contrário do que sucedeu em [Gonen e Yazicioglu, 2007].

Saliente-se que no presente estudo utilizaram-se provetes de pequenas dimensões, por conseguinte envolvendo pequenos volumes de betão, e sem armaduras, o que pode não simular adequadamente as condições de compactação deficientes numa obra. Considera-se interessante o desenvolvimento de estudos similares, em protótipos de elementos estruturais, o que permitirá quantificar a influência da compactação na durabilidade das estruturas, em condições mais próximas das reais.

De facto, Gonçalves [1987], apesar de não ter obtido uma associação clara entre a compactação e a resistência à compressão em provetes, observou reduções de resistência à compressão em elementos estruturais, nos casos em que não se aplicou uma compactação adequada. Nessa medida, suspeita-se que a influência da compactação na resistência à carbonatação em elementos estruturais seja superior à observada em provetes.

REFERÊNCIAS

- Branco, F. & Brito, J., Handbook of concrete bridge management, ASCE Press (2004).
- British Standards Institute, BS 1881: Part 120 "Testing concrete. Method for determination of the compressive strength of concrete cores" (1983).
- CEB, Durable concrete structures. CEB design guide, Bulletin d'Information 182, CEB (1989).
- Ferreira, M. et al., Parecer sobre o estudo de durabilidade dos betões da Ponte Vasco da Gama, Relatório 49/96 – DMC, LNEC (1996).
- Gonçalves, A., A resistência do betão nas estruturas, Tese de especialista, LNEC (1987).
- Gonen, T. & Yazicioglu, S., The influence of compaction pores on sorptivity and carbonation of concrete, Construction and Building Materials 21 (2007) 1040-1045.
- Guerinet, M., La durabilité des bétons, Travaux, 816 (2005) 65-71.
- Instituto Português da Qualidade, NP EN 197-1 "Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes" (2001).
- Instituto Português da Qualidade, NP EN 12390-2 "Ensaio do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica " (2003).
- Instituto Português da Qualidade, NP EN 206-1 "Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade" (2005).
- Neves, R., A permeabilidade ao ar e a carbonatação do betão nas estruturas, Tese de doutoramento, IST (em finalização).
- Salta, M. et al., Ponto da situação das acções de acompanhamento dos betões da Ponte Vasco da Gama. Apreciação da sua durabilidade, Nota Técnica 2/96 - DMC, LNEC (1996).